

Anwendung geführter Wellen aus der Überprüfung der Sensorkopplung für die Bestimmung von Prüfkörpereigenschaften und Schädigungsgrad

Gaspard CLERC¹, Peter NIEMZ¹, Andreas J. BRUNNER²,
Jan-Willem G. VAN DE KUILEN³

¹ Fachhochschule Bern, Architektur, Holz und Bau, Biel, Schweiz

² Empa, Dübendorf, Schweiz

³ Technische Universität München, Holzforschung München (HFM), München

Kontakt E-Mail: gaspard.clerc@bfh.ch

Kurzfassung. Im Rahmen quasistatischer und zyklischer, bruchmechanischer Biegeversuche an verklebten Holzprüfkörpern wurden diese mit resonanten Schallemissionssensoren überwacht. Zweck der Schallemissionsanalyse war, neben visueller Beobachtung und Auswertung der Nachgiebigkeit ein weiteres, unabhängiges Kriterium für Rissbeginn und Rissfortschritt zu nutzen. Zusätzlich wurde beim Beginn und am Ende jedes Versuchs die Kopplung der Schallemissionssensoren mittels elektrischer Pulsanregung jedes Sensors und Aufzeichnung der Wellenformen mit den übrigen Sensoren überprüft. Die dadurch in den balkenförmigen Prüfkörpern entstehenden Lambwellen können, neben der Kontrolle der Sensorkopplung, auch für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls der Prüfkörper in Ausbreitungsrichtung der Wellen vor und nach der Rissausbreitung und somit auch für eine vergleichende Abschätzung des Schädigungsgrads genutzt werden. Der Beitrag diskutiert ausgewählte Ergebnisse dieser Analysen. Diese zeigen das Potential der Methode geführter Wellen in Kombination mit Schallemissionsüberwachung zur Bestimmung der Schädigungsentwicklung.

Einführung

Wird bei Schallemissionsüberwachung bruchmechanischer Versuche die Kopplung der Schallemissionssensoren mittels sogenannter Autokalibration, d.h. Anregung der einzelnen Sensoren durch ein elektrisches Signal und Aufzeichnung dieser Signale mit den übrigen Sensoren, überprüft, entspricht dies effektiv der Charakterisierung des Prüfobjekts mittels geführter Wellen. Diese Signale können über die Messung der Laufzeiten zur Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls des Materials genutzt werden. Weiter kann durch einen Vergleich der Signallaufzeiten bzw. des Elastizitätsmoduls zu unterschiedlichen Zeiten bzw. bei unterschiedlicher Risslänge bestimmt werden, ob sich die Rissbildung oder die Schädigung im Material auf die makroskopischen Materialkennwerte auswirkt. Dies wurde z.B. für Zugversuche an verklebten GFK-Profilen unter Zugbelastung untersucht (Brunner et al. 2008; Brunner et al. 2010). Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Mustererkennungs- bzw. Klassierungsalgorithmen, bei denen die Veränderung der Signale



mit zunehmender Schädigung quantitativ ausgewertet (Barbezat et al. 2007) und somit als Indikator für Schädigung oder Strukturintegrität genutzt werden kann. Diese Methodik wird erstmals auf bruchmechanische Schädigung verklebter Holzprüfkörper unter quasistatischer und zyklischer Mode II bruchmechanischer Schubbelastung angewendet.

Material und Methode

Für die Versuche wurde ausgewähltes Buchenholz (*Fagus sylvatica* L.) mit einer mittleren Dichte von 714 kg/m^3 verwendet. Prüfkörper sind verklebte Holzbalken (Abb. 1), die beiden Balkenhälften wurden mit einem eher spröden Phenol-Resorcinol-Formaldehyd (PRF) bzw. je einem von zwei duktilen, einkomponentigen Polyurethankleber (Loctite HB110 Purbond mit Zusatz kurzer Polyamidfasern oder Loctite VN3158 ohne Fasern) verklebt. Eine $15 \text{ }\mu\text{m}$ dicke Folie (ETFE230N) wurde als Trennfolie zur Anrißbildung eingelegt. Holz ist ein anisotropes Material mit drei Symmetrieachsen (longitudinal L, tangential T und radial R in Abb. 1) und entsprechenden elastischen Konstanten E_L , E_T und E_R .

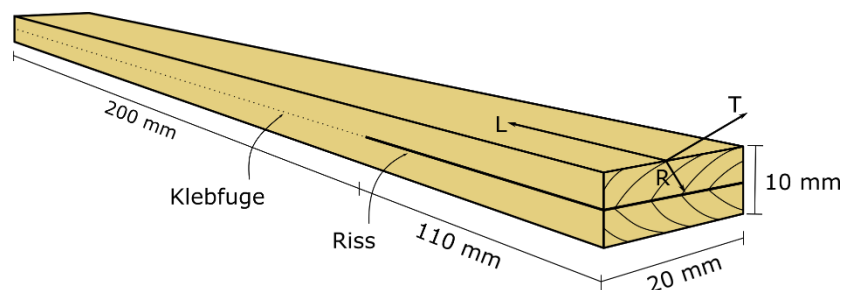


Abb. 1: Prüfkörper mit Dimensionen und Orientierung des Holzes.

Für die quasistatische bzw. Zyklische bruchmechanische Mode II Belastung wurde eine servohydraulische Prüfmaschine (Typ Instron 1237) mit einer Lastmessdose von 1 kN benutzt. Die quasistatische Belastung erfolgte mit 1 mm/min , die zyklische unter Wegsteuerung mit 5 Hz Sinus ab einer Vorbelastung, die einer Deformation von 13.36 mm (bzw. ca. 400 N Last) entspricht. Die Amplitude der zyklischen Belastung war $\pm 2.1 \text{ mm}$ (bzw. ca. $\pm 200 \text{ N}$ Last). Die Prüfkörper wurden mit je sechs Schallemissionssensoren (Typ SE150-M von Dunegan) bestückt (Abb. 2, Sensoren 1-6) und die Signale mit einer Anlage (Typ AMSY-6 von Vallen) mit Vorverstärkern (Typ AEP-3) mit Frequenzfilter zwischen 30 und 1000 kHz aufgezeichnet. Die Schwelle beträgt 40 dB_{AE} , die "duration discrimination" $400 \text{ }\mu\text{s}$ und die "rearm-time" 1 ms . Wellenformen wurden mit 5 MHz Abtastrate aufgezeichnet. Die Autokalibration, d.h. die Anregung der geführten Wellen erfolgte bei Vorlasten von 1 N , 5 N und 10 N . Eine erste Auswertung der Schallemissionsüberwachung wird in (Brunner et al. 2018) diskutiert.

Der statische Elastizitätsmodul für den Vergleich mit den dynamisch aus der Schallemission bestimmten Werten wurde aus der Nachgiebigkeit des Balkens bei einer Last von 35 N berechnet. Der dynamische Elastizitätsmodul wurde aus der Differenz der Ankunftszeiten der Signale bei den Sensoren und den bekannten Sensorabständen sowie der Holzdichte berechnet. Werte für die Elastizitätsmodule in Längsrichtung, $E_{\text{längs}}$, (L in Abb. 1) und in transverser Richtung, E_{trans} , (senkrecht zur Klebfuge in Abb. 1) werden mit Formel (1) aus den Ankunftszeiten der Signale bei den entsprechenden Sensorpositionen berechnet:

$$E = c^2 \cdot \rho \quad (1)$$

dabei bedeutet c die Signalgeschwindigkeit und ρ die Rohdichte des Holzes. In L-Richtung entspricht die elastische Konstante (E_L) dem Wert von $E_{\text{längs}}$, aber bei einem Faserwinkel

ungleich Null entspricht E_{trans} einer Mischung aus den elastischen Konstanten in radialer bzw. tangentialer Richtung (E_R und E_T). Diese beiden Werte können aus den Formeln (2) bzw. (3) bestimmt werden.

$$E_R = E_{trans} \cdot 2 \cdot [\sin \alpha^2 + 0.5 \cdot \cos \alpha^2] \quad (2)$$

$$E_T = 0.5 \cdot E_R \quad (3)$$

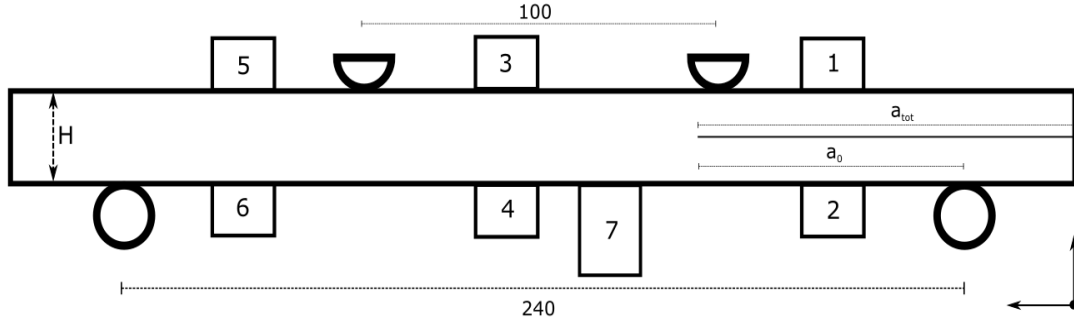


Abb. 2: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für Vier-Punkt-Biegebelastung, die mit Zahlen bezeichneten Quadrate/Rechtecke sind die Schallemissionssensoren.

Mit ausgewählten Schallemissionswellenformen der bei der Autokalibration emittierenden Sensoren (Cluster 1) sowie entsprechend von den anderen Sensoren aufgezeichneten Wellenformen vor (Cluster 2) und nach dem bruchmechanischen Mode II Versuch (Cluster 3) konnte mit einem Klassifikations-Programm (VisualClass® von Vallen) ein sogenannter Klassifikator ("Classifier") erstellt werden, der eine klare Trennung dieser Prototypensignale in drei Cluster ergab. Die übrigen aufgezeichneten Signale wurden dann mittels Klassifikator den Clustern zugewiesen. Da die jeweils emittierenden und aufzeichnenden Sensoren bekannt sind, kann die durch den Klassifikator ermittelte Signalzuordnung zu den Prototypenklassen (Cluster 1-3) überprüft werden.

Ergebnisse und Diskussion

Die Mittelwerte der Elastizitätsmodule $E_{längs}$ und E_{trans} aus den Schallemissionsmessungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Dies zeigt, dass nicht alle Sensorkombinationen physikalisch sinnvolle Werte liefern. Tabelle 2 zeigt den Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichungen des mit Schallemissionssignalen aus quasi-statischen mechanischen Versuchen bestimmten dynamischen Elastizitätsmoduls mit dem aus mechanischen Versuchen bestimmten $E_{längs}$ für die drei unterschiedlichen Klebersysteme. Die beiden Methoden zeigen eine recht gute Übereinstimmung. Die Unterschiede zwischen den Werten der einzelnen Klebersysteme sind vermutlich eher auf Unterschiede im verwendeten Holz als auf den Klebertyp zurückzuführen.

Die Werte für E_{trans} können nicht direkt mit mechanisch bestimmten Werten verglichen werden. Die aus E_{trans} berechneten Werte von E_R bzw. E_T von 2869 ± 243 MPa bzw. 1435 ± 121 MPa sind, wenn auch tendenziell etwas hoch, mit Literaturwerten vergleichbar (Westermayr et al. 2017; Niemz and Sonderegger 2017). Wie von (Chauhan and Sethy 2016; Bachtiar et al. 2017) beschrieben, ergibt die Bestimmung elastischer Konstanten mittels akustischer Wellen meist höhere Werte als mit mechanischer Charakterisierung. Werden Ultraschallwellen genutzt, werden sehr hohe Unterschiede beobachtet und Gleichung (1) gilt nicht mehr, da der Einfluss des Poisson-Verhältnisses vernachlässigt wird. Für die hier verwendeten Frequenzen (ca. 120 kHz) kann dieser Effekt vernachlässigt werden, vor allem, wenn man berücksichtigt, dass die Differenzen zu mechanischen Messungen etwa 10%

betragen sollte (Niemz and Sonderegger 2017). Die Genauigkeit der Methode zur Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls hängt von der Genauigkeit der Massenbestimmung ab. Für $E_{l\ddot{a}ngs}$ scheint die Methode genügend genau zu sein, da diese Werte gut mit den mechanisch bestimmten Elastizitätsmodulen übereinstimmen. Ob bei den transversalen Werten die Klebfuge eine Rolle spielt, z.B. durch Einfluss auf die Signalausbreitungsgeschwindigkeit, ist nicht klar. Da die Werte im Vergleich zu Literaturwerten etwas hoch erscheinen, sollten sie mit zusätzlichen, unabhängigen Messungen für E_R bzw. E_T überprüft werden.

Tabelle 1: Mittelwerte der nominell aus den Kombinationen der Schallemissionssensoren berechneten, dynamischen elastischen Konstanten für einen mit PRF verklebten Prüfkörper. Werte für $E_{l\ddot{a}ngs}$ sind grün, Werte für E_{trans} blau, schwarze Werte entsprechen Sensorkombinationen, welche Kombinationen der Holzorientierung entsprechen und physikalisch nicht eindeutig interpretierbar sind.

Sender\Empfänger	1	2	3	4	5	6
1	-	2448980	13185	12271	11666	14491
2	1875000	-	13423	9305	13158	13262
3	12934	14096	-	2173	13619	15123
4	13521	13377	2155	-	13252	12194
5	27923	28295	13619	13289	-	2049
6	30990	27766	15304	12194	2083	-

Tabelle 2: Vergleich der aus Schallemissionssignalen (AE) berechneten, dynamischen Elastizitätsmodule $E_{l\ddot{a}ngs}$ mit jenen aus quasi-statischen mechanischen Versuchen

	AE		Mechanisch	
	Mittelwert [MPa]	Variations- Koeffizient [%]	Mittelwert [MPa]	Variations- Koeffizient [%]
VN (N=3)	16372	1.9	16778	2.9
PRF (N=4)	15624	2.5	15519	1
HB 110 (N=4)	15835	3	15772	1.8

Im Prinzip kann diese Methode auch dazu verwendet werden, Hinweise auf Delaminationen zu erhalten, was in Tabelle 2 offensichtlich zu unphysikalisch hohen Werten für bestimmte Sensorkombinationen führt. Dieser Ansatz kann in Fällen, wo die Delaminationen von aussen bzw. auf der Oberfläche der Bauteile nicht erkennbar sind, nützlich sein.

Einfluss der Rissausbreitung auf den Elastizitätsmodul

Die für E_{long} und E_{trans} nach den quasi-statischen bzw. zyklischen Versuchen für die drei Kleber gemessenen Änderungen sind mit den entsprechenden Risslängen in Tabelle 3 zusammengefasst. Generell nehmen die Elastizitätsmodule mit zunehmender Risslänge ab. Ob diese Abnahme signifikant von der Art des Klebers und/oder der Belastung (quasi-statisch bzw. zyklisch) abhängt, kann nicht eindeutig festgestellt werden. Die Werte für E_{trans} sind im Mittel aber höher als jene für $E_{l\ddot{a}ngs}$, letztere liegen im Mittel bei etwa -2.0%. für E_{trans} sind die Werte für vergleichbare Risslängenzunahme deutlich niedriger, mit einer Abnahme im Mittel von -4.5%.

Tabelle 3: Prozentuale Änderung der Werte $\Delta E_{\text{längs}}$ und ΔE_{trans} für jeden Prüfkörper und die entsprechende Risslänge (ZYK = zyklische, QS = quasistatische Versuche)

		$\Delta E_{\text{längs}}$	ΔE_{trans}	Risslängenzunahme [mm]
VN	ZYK	0.3%	0.4%	56
		-3.6%	-11.9%	80
		-1.3%	-4.2%	90
	QS	0.4%	-0.5%	54
		-1.4%	-10.4%	70
		-3.4%	-18.7%	100
PRF	ZYK	-0.9%	0.4%	20
		-1.0%	0.9%	20
		-5.0%	-0.8%	16
		-2.7%	1.0%	0
	QS	-0.9%	0.4%	13
		-1.4%	0.2%	36
		-0.9%	0.5%	28
		-1.0%	0.7%	30
HB110	ZYK	-1.1%	2.3%	45
		-3.5%	3.2%	38
		-1.0%	-0.1%	34
	QS	-0.5%	-12.1%	79
		-1.0%	-13.5%	74
		-5.7%	-20.4%	71
		-1.9%	-11.9%	76

Abb. 3 untersucht die Korrelation zwischen der Zunahme der Risslängen und den aus den Laufzeiten der Schallemissionssignale bestimmten Werte von $E_{\text{längs}}$ (Abb. 3 links) bzw. E_{trans} (Abb. 3 rechts). Für $E_{\text{längs}}$ ist daraus keine eindeutige Korrelation nachweisbar, allerdings bei einer Streuung von etwa ± 1 % in den Daten. Für E_{trans} dagegen, nehmen die Werte, mindestens für längere Risse ab ca. 60 mm, deutlich ab. Dies entspricht etwa der Position der Sensoren 3 und 4 (Abb. 2) und da wirkt sich die zunehmende Delamination offenbar deutlicher auf die Signallaufzeiten aus, was in der Longitudinalrichtung ($E_{\text{längs}}$) nicht der Fall ist.

Die mittels Autokalibration aufgezeichneten emittierten und aufgezeichneten Wellenformen der einzelnen Sensorkombinationen lassen sich mit dem Signalklassifikationsprogramm unterscheiden und drei unterschiedliche Klassen zuweisen. Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der Klassierung mit dem entsprechenden Distanzverhältnis ("Distance-ratio"), d.h. jenem Wert, der vom Klassierungsprogramm als Mass für die Korrektheit der Zuordnung berechnet wird für sämtliche Signale im Vergleich vor und nach den bruchmechanischen Versuchen. Wie oben erwähnt, kann die Zuordnung der Schallemissionssignale mittels Klassifikator zu den Clustern unabhängig überprüft werden. Diese Analyse zeigt, dass vor dem Versuch etwa 85% der Signale korrekt dem Cluster 2 und nach dem Versuch dem Cluster 3 zugewiesen werden. Die emittierten Signale werden mit 100% dem korrekten Cluster 1 zugewiesen. Die Distanzverhältnisse der Signale (Abb. 4) sind relativ niedrig, was auch mit der mehrheitlich korrekten Zuordnung durch den Klassifikator korreliert.

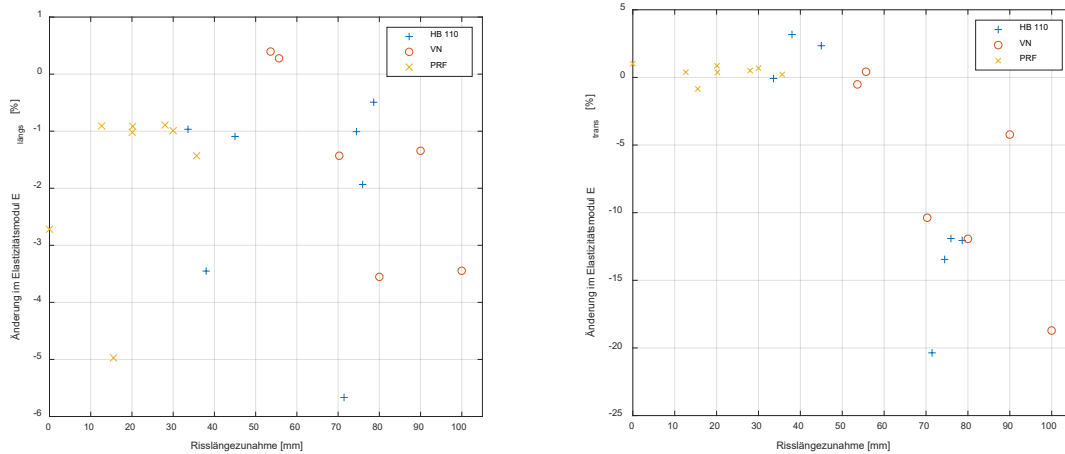


Abb. 3: Darstellung der Korrelation zwischen Werten von (links) $E_{läng}$ und (rechts) E_{trans} in Funktion der Risslängenzunahme.

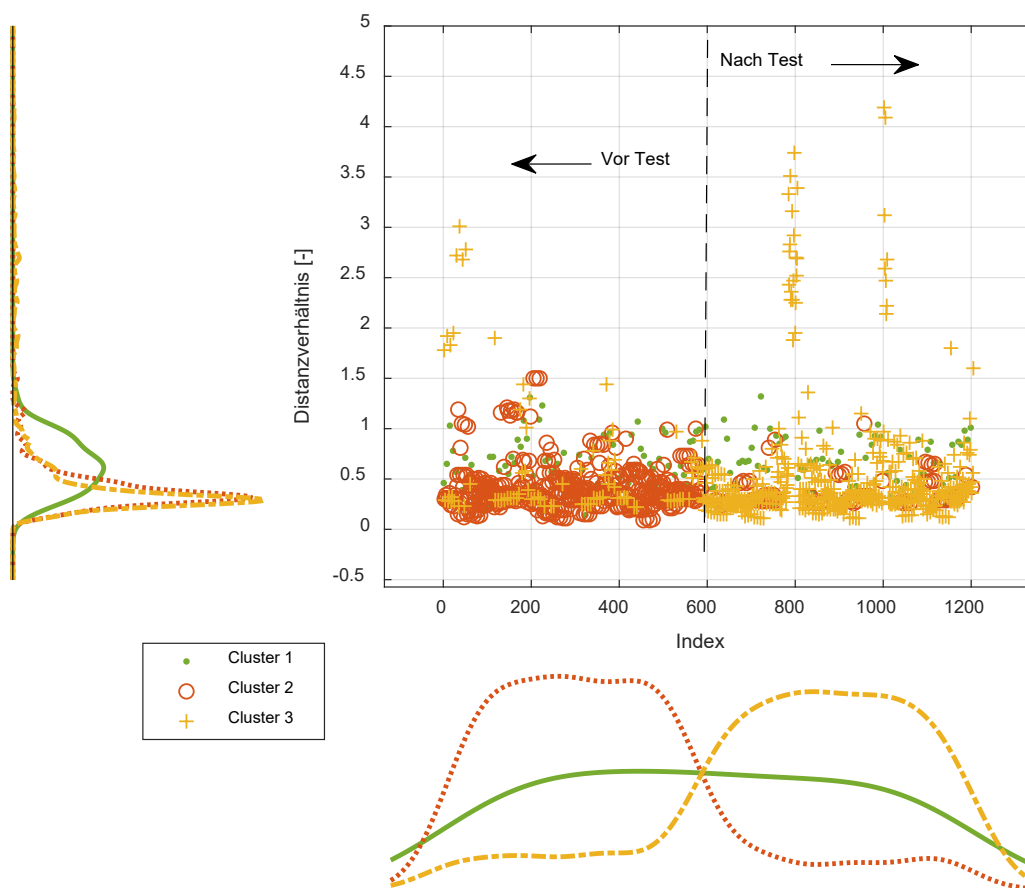


Abb. 4: Darstellung der Clusteranalyse aus der Signalklassierung der Schallemissionswellenformen

Auch wenn die gemessenen Elastizitätsmodule nach den bruchmechanischen Versuchen wie erwartet abgenommen haben, ist keine klare Korrelation mit der Risslängenzunahme erkennbar (Abb. 3). Neben der auch visuell beobachteten Delamination in bzw. in der Nähe der Klebfuge kann zusätzliche, mikroskopische Schädigungsentwicklung ausserhalb des

makroskopischen Risses nicht ausgeschlossen werden. Auch kleine Risse im Holz, in der sogenannten bruchmechanischen Prozesszone können sich auf die Elastizitätsmodule auswirken, sofern sie in genügender Anzahl, Dichte und eventuell Orientierung entstehen. Eine in ihrer Grösse etwa vergleichbare Prozesszone in quasistatischen und zyklischen Versuchen für jeden Klebertyp würde erklären, weshalb dort keine signifikanten Unterschiede in $E_{\text{längs}}$ beobachtet wurden.

Aus der Signalklassierung der Autokalibrationssignale kann geschlossen werden, dass die Schädigung (Risslängenzunahme) einen Einfluss auf die Schallemissionssignale bzw. deren Leistungsspektren (in Funktion der Frequenz) hat. Die dem zu Grunde liegenden, unterschiedlichen Mechanismen können aber mit der Klassierung selbst nicht identifiziert werden. Dafür sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Untersuchung haben Folgendes gezeigt: (1) Durch Autokalibration mit einem Schallemissionsmessgerät angeregte, geführte Wellen im niederfrequenten Ultraschallbereich erlauben eine einfache und schnelle Abschätzung der dynamischen Elastizitätsmodule in den drei Orientierungen verklebter Holzprüfkörper, die Werte korrelieren mit jenen aus quasistatischer Biegebelastung. (2) Die Modulmessung mittels Autokalibration zeigt Schädigung wie z.B. Rissbildung in oder nahe der Verklebung im Prüfkörper an, es ergeben sich in diesem Fall physikalisch unrealistische Werte. (3) Trotz Hinweisen auf Schädigung bzw. Schädigungsentwicklung im Prüfkörper ist damit aber noch keine direkte Quantifizierung des Schädigungsgrads möglich. Auch die Identifikation der entsprechenden, mikroskopischen Schädigungsmechanismen benötigt zusätzliche Informationen. Dies erfordert vertiefte Untersuchungen.

Dank

Die Herstellung der Belastungsvorrichtung, der Prüfaufbau sowie die Versuchsdurchführung und die Datenaufzeichnung durch Hr. Daniel Völki wird herzlich verdankt, ebenso wie Hinweise zur Optimierung der Vier-Punkt-Belastungsvorrichtung durch Frau Dr. Magdalena Pérez-Galmés (Universitat Girona).

Referenzen

Bachtiar, Erik V.; Sanabria, Sergio J.; Mittig, Johannes P.; Niemz, Peter (2017): Moisture-dependent elastic characteristics of walnut and cherry wood by means of mechanical and ultrasonic test incorporating three different ultrasound data evaluation techniques. In *Wood Sci Technol* 51 (1), pp. 47–67.

Barbezat, M.; Brunner, A. J.; Huber, C.; Flüeler, P. (2007): Integrated Active Fiber Composite Elements: Characterization for Acoustic Emission and Acousto-ultrasonics. In *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 18 (5), pp. 515–525.

Brunner, A. J.; Terrasi, G. P.; Vallée, T.; Keller, T. (2008): Acoustic emission analysis and acousto-ultrasonics for damage detection in GFRP adhesive joint. In *Proceedings 8th European Conference on Acoustic Emission, European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE)*.

Brunner, A.J; Tannert, T.; Vallée, T. (2010): Waveform Analysis of Acoustic Emission Monitoring of Tensile Tests On Welded Wood-Joints. In *Journal of Acoustic Emission* 28, pp. 59–67.

Brunner, A.J.; Clerc, G.; Niemz, P. (2018): Acoustic Emission Monitoring of Adhesively Bonded Wood Joints Under Quasistatic And Cyclic Fatigue Mode II Flexure Loads Using End-Notch-Flexure Specimens Proceedings 33rd Acoustic Emission Conference (EWGAE), pp. 116–125.

Chauhan, Shakti; Sethy, Anil (2016): Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. In *Maderas, Cienc. tecnol.* (2), pp. 373–382.

Niemz, Peter; Sonderegger, Walter (2017): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe: Carl Hanser Verlag.

Westermayr, M.; Hunger, F.; van de Kuilen, Jan-Willem G. (2017): Strength and stiffness perpendicular to the grain of ash (*Fraxinus e.*) and beech (*Fagus s.*) in comparison to spruce (*Picea a.*). In *International Scientific Conference on Hardwood Processing (ISCHP2017)*, pp. 52–59.